doi:10.13866/j.azr.2019.03.11

炭化温度和时间对盐角草生物炭产率及理化性质的影响①

毛明月[1,2]， 赵振勇[1]， 王守乐[1,2]， 田长彦[1]

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 新疆是中国最大盐土分布区,盐生植物资源极为丰富且具有较强的吸盐聚盐能力。以盐角草(*Salicornia europaea*)为材料,研究炭化温度和时间对盐角草的生物炭产率及理化特性的影响。结果表明:炭化能有效增加盐角草 pH、*EC*(电导率)和灰分含量,其中生物炭 pH 最高达 10.37,生物炭灰分含量与盐角草灰分含量相比增加了 57.51% ~110.98%。在 300 ~600 ℃,随着炭化温度的升高,生物炭 pH、*EC*、灰分含量显著增加,而产率降低;生物炭水溶性 Ca^{2+}、Mg^{2+} 含量随温度(≥400 ℃)降低,Na^+、K^+ 等低价离子富集;生物炭全钾、全磷含量随温度逐渐增加,全碳、全氮含量则降低。随着炭化时间的增加,pH、*EC* 及灰分含量逐渐升高,碳含量逐渐降低,且水溶性离子含量增加。根据生物炭理化特性,炭化时间 2 h 为最适宜的炭化时间。该研究可为生物炭改良酸性土壤原料选择以及植物生物炭制备工艺优化提供新途径。

关键词: 盐角草; 生物炭; 炭化温度; 炭化时间; 理化性质

盐角草(*Salicornia europaea*)为藜科盐角草属一年生草本植物,茎肉质化,是已知最耐盐的真盐生植物之一[1],具有高抗盐能力和盐富集能力,常被作为生物措施用于盐碱地的改良[2],广泛分布在盐沼和低湿洼地高盐度区[3],在生态保护和恢复中起重要作用,是恶劣生境下的重要碳汇植物。刈割后的盐角草可用作生物盐添加剂,与饲用玉米混合青贮以制备青贮饲料,制作生物炭是其资源化利用的一个新途径。

生物炭特性与其材料来源及制备条件有着密切的联系。目前,常用的生物炭制备原料主要为林草和作物的废弃物(树枝、木屑、秸秆、糠皮等)及酒糟、甘蔗渣、畜禽粪等有机废物[4-7],以盐角草等真盐生植物作为原材料制取生物炭的研究尚未见报道。生物炭制备过程中炭化时间和温度是非常关键的因素。生物炭的炭化程度会随着炭化温度的升高而增加,而生物炭产率等则降低;pH 随炭化温度升高而升高,并与灰分含量呈正相关[8-11]。另有研究表明,炭化温度 500 ℃时,生物炭呈现稳定状态[12-14]。Lua 等[15]以开心果壳为原料,在 500 ℃下制备生物炭,裂解时间从 1 h 增加至 2 h 后,生物炭的产率显著降低,当裂解时间继续增加时,生物质炭的产率基本保持在 30% 左右,而生物炭的比表面积则呈现先增加后减小的变化趋势。

我国南方地区土壤中淋溶作用强烈,土壤中钾、钙和镁等盐基养分含量低,土壤酸度高,使土壤阳离子交换量(CEC)减小,土壤的保肥能力下降[16]。生物炭一般呈碱性,含有 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 等盐基离子,进入土壤以后会有一定程度的释放,交换土壤中的 H^+ 和 Al^{3+},提高盐基饱和度并调节土壤 pH 值[17]。同时,所含的 K、Ca、Mg 也是植物所必需的营养元素[18]。因此,生物炭既是很好的生物炭基肥料,又是酸性土壤的调节剂[19],盐角草植株体内盐含量达地上部干重的 50%[2]。

本研究以盐角草为研究对象,分别在不同的炭化温度、时间下进行炭化制备生物炭,测定包括产率、pH、*EC*(电导率)、灰分含量、离子含量等理化指标,研究不同炭化方式下制备的生物炭特性。为后

① **收稿日期:** 2018-09-13; **修订日期:** 2018-10-16
基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0501403);克拉玛依市科技局项目(sk2016-05);新疆油田公司科技项目“碳汇林基地盐碱地种植改良技术试验与推广”共同资助
作者简介: 毛明月(1991-),男,硕士研究生,研究方向为盐生植物开发与利用. E-mail:maomingyue0324@163.com
通讯作者: 田长彦. E-mail:tianchy@ms.xjb.ac.cn

续盐生植物制备生物炭基肥料改良酸性土壤方面提供参考。

1 材料与方法

实验所用盐角草取自克拉玛依大农业地区盐生植物园，特性见表1。

1.1 生物炭的制备

盐角草秋季成熟后刈割地上部，在65 ℃的烘箱中烘干，切成2～3 cm备用。称取一定量烘干后的盐角草置于坩埚中，在马弗炉（型号：SX2－4－10）中于300 ℃、400 ℃、500 ℃和600 ℃分别炭化2 h。另称取一定量烘干后盐生植物置于坩埚中，在马弗炉中于500 ℃分别炭化1 h、2 h、3 h。磨细后过2 mm筛，进行分析测定。

表1　盐角草特性

Tab.1　Properties of *Salicornia europaea*

pH	*EC*/(mS·cm^{-1})	Cl^-/(g·kg^{-1})	SO_4^{2-}/(g·kg^{-1})	Ca^{2+}/(g·kg^{-1})	K^+/(g·kg^{-1})
5.96	1.24	170.644	10.340	3.055	11.947
Mg^{2+}/(g·kg^{-1})	Na^+/(g·kg^{-1})	全碳/%	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	全钾/(g·kg^{-1})
12.381	117.498	26.23	13.918	0.980	11.353

1.2 分析方法

1.2.1 pH、*EC*以及水溶性离子测定　生物炭0.400 g（<2 mm）于200 mL无CO_2蒸馏水中振荡30 min（1∶500），取过滤后的清液用于测定。浸出液当天需要测定pH（用精密pH计测定），*EC*（用电导率仪测定）。K^+和Na^+用火焰光度计测定，Ca^{2+}和Mg^{2+}用电感耦合等离子发射光谱（美国安捷伦735 ICP-OES）测定，Cl^-、SO_4^{2-}采用离子色谱仪（美国戴安ICS－5000）测定。

1.2.2 全碳　采用总有机碳分析仪测定。

1.2.3 全量氮磷钾　① 消解：浓硫酸＋高氯酸；② 全氮用全自动定氮仪测定，全磷用钼锑抗比色法测定，全钾用原子吸收测定。

1.2.4 灰分按照土壤农化分析测定[20]。

1.3 数据统计与分析

所有数据均为3次重复的平均值，用SPSS 19单因素方差分析（ANOVA）进行差异显著性比较、SigmaPlot作图。

2 结果与分析

2.1 炭化温度对生物炭特性的影响

2.1.1 炭化温度对生物炭产率、pH、*EC*、灰分含量的影响　从表1和表2可以看出，炭化能有效增加盐角草pH、*EC*（电导率）和灰分含量，随着炭化温度的升高，生物炭pH、*EC*、灰分含量显著增加，产率则不断降低。生物炭产率在300～600 ℃为64.81%～46.02%（$P<0.05$）；pH从7.19升高至10.37，与植物样pH 5.96相比增加了24.64%～73.99%（$P<0.05$），炭化温度>500 ℃时，生物炭pH趋于稳定，差异无统计学意义（$P>0.05$）；*EC*也由1.72升高至2.40 mS·cm^{-1}，与植物样*EC* 1.24相比增加了38.71%～93.55%（$P<0.05$）；灰分含量为56.94%～76.27%，与植物样灰分含量36.15%相比增加了57.51%～110.98%（$P<0.05$）。

表2　炭化温度对生物炭产率、pH、*EC*、灰分含量的影响

Tab.2　Effects of carbonization temperature on the yield, pH, *EC* and ash content of biochar

炭化温度/℃	产率/%	*EC*/(mS·cm^{-1})	pH	灰分含量/%
CK	–	1.24e	5.96d	36.15e
300	64.81a	1.72d	7.19c	56.94d
400	55.81b	1.91c	9.79b	62.78c
500	49.17c	2.08b	10.28a	68.37b
600	46.02d	2.40a	10.37a	76.27a

注：同列不同字母代表处理间差异达到显著水平（$P<0.05$）。下同。

2.1.2 炭化温度对生物炭离子含量的影响　炭化能增加盐角草水溶性Cl^-、Na^+、K^+含量（图1），在300～600 ℃内分别为245.974～350.781 g·kg^{-1}、162.941～241.376 g·kg^{-1}、15.081～22.166 g·kg^{-1}，与植物样（CK）相比分别增加了44.15%～105.57%、38.67%～105.43%、26.19%～85.52%，并且随着炭化温度的升高与含量逐渐增加（$P<0.05$），炭化温度由300 ℃升高至600 ℃时，水溶性Cl^-、Na^+、K^+含量较300 ℃分别提高了42.61%、48.14%、46.98%。盐角草生物炭SO_4^{2-}含量，当炭化温度>400 ℃时趋于稳定，差异无统计学意义（$P>0.05$），在600 ℃时，含量最高20.577 g·kg^{-1}，较植物样10.340 g·kg^{-1}增加了99.00%。

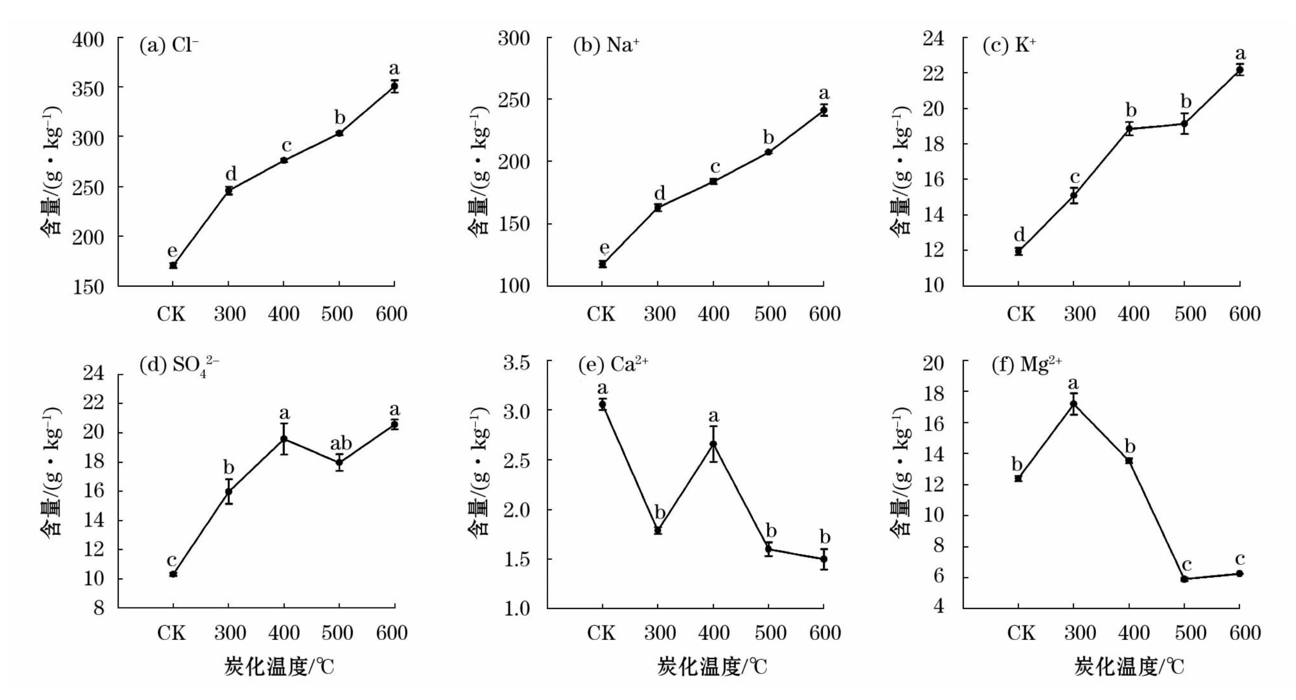
300 ℃时,生物炭水溶性 Mg^{2+} 含量最高 17.176 g · kg^{-1},与植物样 12.381 g · kg^{-1}相比增加了 38.73%($P<0.05$)。但随着炭化温度的升高,含量逐渐降低,在炭化温度 >500 ℃时趋于稳定,差异无统计学意义($P>0.05$)。500 ℃时含量最低,为 5.903 g · kg^{-1},较 300 ℃降低了 65.63%($P<0.05$)。盐角草生物炭水溶性 Ca^{2+} 在炭化温度 <400 ℃时,随着炭化温度升高,含量逐渐增加,在炭化温度 >400 ℃时,含量随着温度的增加又逐渐降低,400 ℃时含量最高,为 2.658 g · kg^{-1},除与植物样相比没有显著差异($P>0.05$)外,与其他温度处理间均有显著差异($P<0.05$)。

2.1.3 炭化温度对生物炭全量氮、磷、钾及全碳含量的影响 300 ℃时制备生物炭,全碳含量 27.02%,与植物样(26.23%)相比,差异无统计学意义($P>0.05$),当炭化温度 >400 ℃时,与植物样相比降低 9.31% ~44.73%($P<0.05$);500 ℃时,与 400 ℃相比,碳含量有所增加($P<0.05$);炭化温度 >500 ℃时,碳含量又降低($P<0.05$)。炭化使得植物样全氮含量降低($P<0.05$),并且生物炭全氮含量随着制备温度升高逐渐降低,在 300 ~600 ℃为 9.265 ~4.851 g · kg^{-1}($P<0.05$)(图 2),与植物样(13.918 g · kg^{-1})相比降低了 33.43% ~65.15%。炭化同样降低盐角草全磷含量,但生物炭全磷含量随制备温度的升高而增加,在 300 ~600 ℃为 0.613 ~0.925 g · kg^{-1},与植物样(0.980 g · kg^{-1})相比降低了 37.45% ~5.61%($P<0.05$)。炭化能有效增加植物全钾含量($P<0.05$),并且随着炭化温度的升高,生物炭全钾含量逐渐增加($P<0.05$),在 300 ~600 ℃为 15.017 ~23.213 g · kg^{-1},与植物样(11.353 g · kg^{-1})相比增加了 32.27% ~104.47%。

2.2 炭化时间对生物炭特性的影响

2.2.1 炭化时间对生物炭产率、pH、*EC*、灰分含量的影响 随着炭化时间的增加,生物炭 pH、*EC*、灰分含量逐渐增加,产率在炭化时间 2 h 时,达到最高(表 3)。生物炭产率最高为 49.17%,随着炭化时间增加,pH 值从 10.28 升高至 10.39,增加了 1.07%,*EC* 从 1.92 mS · cm^{-1}升高至 2.22 mS · cm^{-1},增加了 15.63%,灰分含量则从 64.08% 升高到了 74.44%,增加了 16.17%($P<0.05$)。

2.2.2 炭化时间对生物炭离子含量的影响 盐角草生物炭水溶性 Cl^-、Na^+ 随着炭化时间增加而逐渐增加($P<0.05$),含量分别为 281.47 ~323.35 g · kg^{-1}、197.76 ~229.02 g · kg^{-1},分别增加了 14.88% 和 15.81%;水溶性 Ca^{2+} 随着炭化时间增加而逐渐增加,但差异无统计学意义($P>0.05$),含量为 1.30 ~1.875 g · kg^{-1},增加了 44.23%。K^+ 在炭



注:不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 炭化温度对生物炭离子含量的影响

Fig. 1 Effects of carbonization temperature on the ion content in biochar

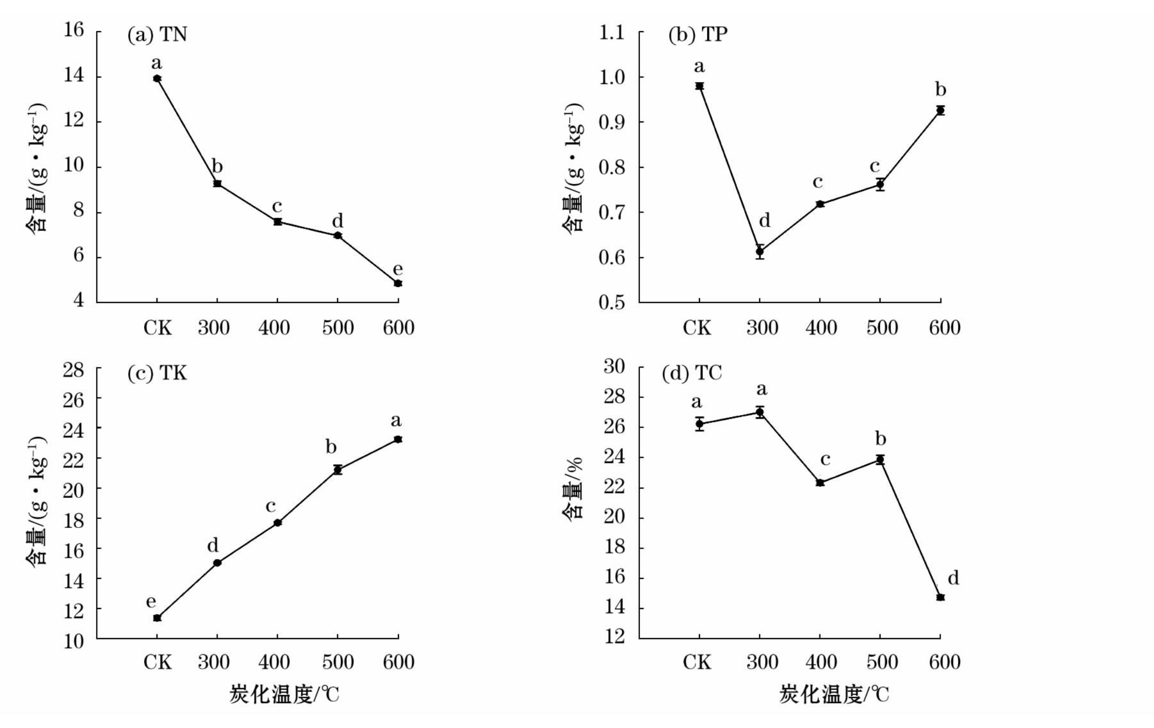


图 2　炭化温度对生物炭全量氮、磷、钾及全碳含量的影响

Fig. 2　Effects of carbonization temperature on the contents of total nitrogen, phosphorus, potassium and total carbon in biochar

表 3　炭化时间对生物炭产率、pH、*EC*、灰分含量的影响

Tab. 3　Effects of carbonization time on the yield, pH, *EC* and ash content of biochar

炭化时间/h	产率/%	*EC*/(mS·cm⁻¹)	pH	灰分含量/%
1	47.68ab	1.92c	10.29b	64.08c
2	49.17a	2.08b	10.28b	68.37b
3	45.72b	2.22a	10.39a	74.77a

化 2 h 时含量最低,为 19.13 g·kg⁻¹。Mg^{2+} 在炭化时间 >2 h 时,差异无统计学意义($P>0.05$),炭化 2 h 时含量最高,为 5.903 g·kg⁻¹;SO_4^{2-} 含量随着炭化时间增加而逐渐增加,在炭化时间 <2 h 时,差异无统计学意义($P>0.05$),最低为 17.489 g·kg⁻¹(表 4)。

2.2.3　炭化时间对生物炭全量氮、磷、钾及全碳含量的影响　盐角草生物炭随着炭化时间的增加,全碳含量逐渐降低($P<0.05$),含量为 25.58% ~20.14%,与炭化 3 h 相比,炭化 1 h 降低了 27.15%。生物炭全磷含量逐渐增加($P<0.05$),含量为 0.655 ~1.103 g·kg⁻¹,与炭化 3 h 相比,炭化 1 h 增加了 68.40%。当炭化 2 h 时,全氮含量最高,为 6.97 g·kg⁻¹,相比于炭化 1 h、3 h,分别增加了 12.51% 和 19.89%,全钾含量最低,为 21.19 g·kg⁻¹,相比于炭化 1 h、3 h,分别降低了 7.12% 和 23.00%(表 5)。

表 4　炭化时间对生物炭离子特性的影响

Tab. 4　Effects of carbonization time on the ion content in biochar

炭化时间/h	Cl^-/(g·kg⁻¹)	SO_4^{2-}/(g·kg⁻¹)	Ca^{2+}/(g·kg⁻¹)
1	281.468c	17.489b	1.300a
2	303.370b	17.975b	1.600a
3	323.353a	24.077a	1.875a
炭化时间/h	K^+/(g·kg⁻¹)	Mg^{2+}/(g·kg⁻¹)	Na^+/(g·kg⁻¹)
1	22.649b	4.599b	197.756c
2	19.129c	5.903a	207.372b
3	25.451a	5.295a	229.018a

表 5　炭化时间对生物炭全量氮磷钾特性的影响

Tab. 5　Effects of carbonization time on the contents of total nitrogen, phosphorus and potassium in biochar

炭化时间/h	全氮/(g·kg⁻¹)	全磷/(g·kg⁻¹)	全钾/(g·kg⁻¹)	全碳/%
1	6.100b	0.655c	22.700b	25.58a
2	6.968a	0.762b	21.191c	23.87b
3	5.588c	1.103a	26.064a	20.14c

3　讨 论

生物质原料的成分决定了生物炭组成及性

质[21]。生物炭之所以呈碱性,是因灰分中含有大量的矿质元素如 Na、K、Ca、Mg 等,以氧化物或碳酸盐的形式存在其体内[22],且灰分含量越高,碱性越强。生物质本身的灰分含量高,生物炭灰分含量也相应较高[23]。牛文娟[24]研究得出,小麦、水稻、玉米、油菜和棉花等作物秸秆的灰分含量分别为 9.19%、11.90%、7.22%、6.61%和 4.87%,含量较低;林益明等[25]研究不同红树植物木材的灰分含量发现,红树植物灰分含量基本都在 5%以下,均明显低于盐角草灰分含量。Yuan 等[26]的研究结果表明,生物炭的石灰效应与其碱度有关,并且发现土壤 pH 和生物炭的碱度有强烈线性相关关系。本研究中所用盐角草能够有效吸收并富集盐分,Na^+含量较高;灰分含量为 36.15%,生物炭灰分含量最高为 76.27%,作为酸性土壤调理剂具有更强的石灰效应,碱性更强,同时也能够提供一定量的矿质营养元素。因此,盐角草生物炭高灰分、盐分含量的石灰效应和改善植物矿质营养的作用,可为生物炭改良酸性土壤原料选择提供新的参考。

目前,普遍认为炭化温度是造成生物炭理化性质差异的主要因素之一。生物炭的物质组成由炭化终温决定,生物炭的炭化程度会随着裂解温度的升高而增加,其 C、H、O、N 的含量降低,微量元素及灰分含量有所增加[12,27]。而生物炭产率等则随着裂解温度的增加而减少;pH 随裂解温度升高而升高,并与灰分含量呈正相关[8-11]。随着制备温度的升高,无机元素不断富集,但高温条件下,无机元素会在生物炭中形成稳定性更强、溶解度更低的矿物晶体[28-29]。当裂解温度升高至 >500 ℃时,生物炭表面的羟基含量减少,酚羟基和羧基也会随制备温度的升高逐渐减弱,甚至消失[30-31]。本研究中,随着炭化温度的升高,生物炭 pH、*EC*、灰分含量增加,生物炭的产率降低,这与前人的研究结果一致[8-11]。高温 >400 ℃时,生物炭水溶性 Ca^{2+}、Mg^{2+}发生固结作用。但同时伴随着灰分增加,水溶性 Na^+、K^+等低价离子富集,含量增加,pH 和 *EC* 也相应提高。生物炭中含有大量营养元素,除 C 含量较高外,N、K 的含量也较高,C、N 含量由于燃烧和挥发的原因,随温度的升高而降低,而 K、P 含量随温度的升高而增加。因此,若以改良酸性土壤为目的,可以根据土壤具体的酸碱度来选择合理的炭化温度和范围。

随着炭化时间的增加,pH、*EC* 及灰分含量逐渐升高,碳含量逐渐降低,主要是由于持续炭化、生物炭灰化、碳持续燃烧和挥发所致,因此增加了生物炭水溶性离子。本研究中当炭化时间为 2 h 时,生物炭产率最高,K^+、Mg^{2+}、全氮、全钾含量同样出现极值;炭化 3 h 时,产率显著降低。这与之前炭化时间从 1 h 增加到 2 h 后,生物炭的产率显著降低,当炭化时间继续增加时生物炭产率基本保持不变的研究结果有所差异[15]。考虑制备成本及生物炭稳定性,炭化时间 2 h 为最适宜的炭化时间。

4 结 论

(1)炭化能有效增加盐角草 pH、*EC* 和灰分含量,随着炭化温度的升高,生物炭 pH、*EC*、灰分含量显著增加,产率、全碳、全氮含量逐渐降低。

(2)高温 >400 ℃炭化条件下,生物炭水溶性 Ca^{2+}、Mg^{2+}发生固结作用。但同时伴随着灰分增加,水溶性 Na^+、K^+等低价离子富集,含量增加,pH 和 *EC* 也相应提高。

(3)盐角草生物炭中含有大量营养元素,除 C 含量较高外,N、P、K 的含量也较高,C、N 含量由于燃烧和挥发的原因,随温度的升高而降低,而 K、P 含量随温度的升高而增加。

(4)随着炭化时间的增加,pH、*EC* 及灰分含量逐渐升高,碳含量逐渐降低,主要是由于持续炭化,生物炭灰化所致,因此增加了生物炭水溶性离子。

(5)根据生物炭理化特性分析,考虑制备成本及生物炭稳定性,炭化 2 h 为最适宜的炭化时间。

参考文献(References):

〔1〕 赵振勇,张科,田长彦,等. 盐生植物对重盐渍土脱盐效果〔J〕. 中国沙漠,2013,33(5):1 420-1 425.〔Zhao Zhenyong,Zhang Ke,Tian Changyan,et al. Desalination effect of halophytes in heavily salinized soil of Karamay,Xinjiang,China〔J〕. Journal of Desert Research,2013,33(5):1 420-1 425.〕

〔2〕 赵惠明. 盐生植物盐角草的资源特点及开发利用〔J〕. 科技通报,2004(2):167-171.〔Zhao Huiming. Eco-physiological characteristics of halophyte salt-worts and their potential utilization in environmental mediation and germplasm improvement〔J〕. Bulletin of Science and Technology,2004(2):167-171.〕

〔3〕 李宏侠,杨晓东,吕光辉,等. 艾比湖自然保护区盐生植物的分布及其水分利用效率〔J〕. 干旱区研究,2018,35(2):370-378.〔Li Hongxia,Yang Xiaodong,Lü Guanghui,et al. Distribution and water use efficiency of halophytes in the ebinur lake nature re-

serve〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):370 – 378.〕
〔4〕 马秀枝,李长生,任乐,等. 生物质炭对土壤性质及温室气体排放的影响〔J〕. 生态学杂志,2014,33(5): 1 395 – 1 403.〔Ma Xiuzhi,Li Changsheng,Ren Le,et al. Effects of biochar application on soil properties and greenhouse gas emission〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2014,33(5):1 395 – 1 403.〕
〔5〕 Crombie K,Mašek O,Sohi S P,et al. The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods〔J〕. Gcb Bioenergy,2013,5(2):122 – 131.
〔6〕 Mašek O,Budarin V,Gronnow M,et al. Microwave and slow pyrolysis biochar:Comparison of physical and functional properties〔J〕. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2013,100:41 – 48.
〔7〕 Méndez A,Terradillos M,Gascó G. Physicochemical and agronomic properties of biochar from sewage sludge pyrolysed at different temperatures〔J〕. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2013,102:124 – 130.
〔8〕 Zhao L,Cao X,Mašek O,et al. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures〔J〕. Journal of Hazardous Materials,2013,256:1 – 9.
〔9〕 李明,李忠佩,刘明,等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响〔J〕. 中国农业科学,2015,48(7): 1 361 – 1 369.〔Li Ming,Li Zhongpei,Liu Ming,et al. Effects of different straw biochar on nutrient and microbial ommunity structure of a red paddy soil〔J〕. Scientia Agricultura Sinica,2015,48(7):1 361 – 1 369.〕
〔10〕 Mukome F N D,Zhang X,Silva L C R,et al. Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks〔J〕. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2013,61(9): 2 196 – 2 204.
〔11〕 Ronsse F,Van Hecke S,Dickinson D,et al. Production and characterization of slow pyrolysis biochar:Influence of feedstock type and pyrolysis conditions〔J〕. GCB Bioenergy,2013,5(2):104 – 115.
〔12〕 李飞跃,汪建飞,谢越,等. 热解温度对生物质炭碳保留量及稳定性的影响〔J〕. 农业工程学报,2015,31(4):266 – 271.〔Li Feiyue,Wang Jianfei,Xie Yue,et al. Effects of pyrolysis temperature on carbon retention and stability of biochar〔J〕. Transactions of the CSAE,2015,31(4):266 – 271.〕
〔13〕 岳燕. 耐盐植物生物质炭特性及对盐渍化土壤改良培肥的作用与机理〔D〕. 北京:中国农业大学,2017.〔Yue Yan. The Characteristics of Biochar from Halophyte Plants and the Amelioration Effect and Its Mechanism on the Salt-Affected Soil〔D〕. Beijing:China Agricultural University,2017.〕
〔14〕 Zielińska A,Oleszczuk P,Charmas B,et al. Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic〔J〕. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2015,112:201 – 213.
〔15〕 Lua A C,Yang T,Guo J. Effects of pyrolysis conditions on the properties of activated carbons prepared from pistachio-nut shells〔J〕. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2004,72(2): 279 – 287.
〔16〕 袁金华,徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展〔J〕. 土壤,2012,44(4):541 – 547.〔Yuan Jinhua,Xu Renkou. Research progress of amelioration effects of biochars on acid soils〔J〕. Soils,2012,44(4):541 – 547.〕
〔17〕 Topoliantz S,Ponge J F,Ballof S. Manioc peel and charcoal:A potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics〔J〕. Biology and Fertility of Soils,2005,41(1):15 – 21.
〔18〕 Wu W X,Yang M,Feng Q B,et al. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment〔J〕. Biomass and Bioenergy,2012:268 – 276.
〔19〕 陈温福,张伟明,孟军,等. 生物炭应用技术研究〔J〕. 中国工程科学,2011,13(2):83 – 89.〔Chen Wenfu,Zhang Weiming,Meng Jun,et al. Researches on biochar application technology〔J〕. Chinese Engineering Science,2011,13(2):83 – 89.〕
〔20〕 鲍士旦. 土壤农化分析〔M〕. 第 3 版. 北京:中国农业出版社. 2000.〔Bao Shidan. Soil Agrochemical Analysis〔M〕. 3 Ed. tion. Beijing:China Agriculture Press,2000.〕
〔21〕 王月瑛. 生物质炭对三种不同极性有机污染物的吸附机理研究〔D〕. 北京:中国农业大学,2017.〔Wang Yueying. Study of Biochars Adsorption Mechanism of three Kinds of Organic Contaminants〔D〕. Beijing:China Agricultural University,2017.〕
〔22〕 谢祖彬,刘琦,许燕萍,等. 生物炭研究进展及其研究方向〔J〕. 土壤,2011,43(6):857 – 861.〔Xie Zubin,Liu Qi,Xu Yanping,et al. Advances and perspectives of biochar research〔J〕. Soils,2011,43(6):857 – 861.
〔23〕 Abdullah H,Wu H W. Biochar as a Fuel 1. Properties and grindability of biochars produced from the pyrolysis of mallee wood under slow-heating conditions〔J〕. Energy & Fuels,2009,23(8): 4 174 – 4 181.
〔24〕 牛文娟. 主要农作物秸秆组成成分和能源利用潜力〔D〕. 北京:中国农业大学,2015.〔Niu Wenjuan. Composition and Energy Utilization Potential of Main Crop Straw〔D〕. Beijing:China Agricultural University,2015.〕
〔25〕 林益明,林鹏,王通. 几种红树植物木材热值和灰分含量的研究〔J〕. 应用生态学报,2000,11(2):181 – 184.〔Lin Yiming, Lin Peng, Wang Tong. Caloric values and ash contents of some mangrove woods〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2000,11(2):181 – 184.〕
〔26〕 Yuan J H,Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol〔J〕. Soil Use and Management,2011,27(1):110 – 115.
〔27〕 Sohi S,Lopez-Capel E,Krull E,et al. Biochar,climate change and soil:A review to guide future research〔J〕. CSIRO Land and Water Science Report,2009,5(9):17 – 31.
〔28〕 Zheng H,Wang Z,Deng X,et al. Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures〔J〕. Bioresource Technology,2013,130:463 – 471.
〔29〕 Cao X,Harris W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation〔J〕. Bioresource technology,2010,101(14):5 222 – 5 228.
〔30〕 Xu X,Cao X,Zhao L,et al. Removal of Cu,Zn,and Cd from aque-

ous solutions by the dairy manure-derived biochar〔J〕. Environmental Science and Pollution Research,2013,20(1):358－368.
〔31〕 Keiluweit M, Nico P S, Johnson M G, et al. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar)〔J〕. Environmental science and technology, 2010, 44(4): 1 247－1 253.

Effects of Carbonization Temperature and Time on the Yield and Physicochemical Properties of Biochar from *Salicornia europaea*

MAO Ming-yue[1,2], ZHAO Zhen-yong[1], WANG Shou-le[1,2], TIAN Chang-yan[1]
(1. *State Key Laboratory of Desert and Oassis Ecology*, *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Xinjiang is the largest area where saline soil is distributed in China, and rich in resources of halophytes with high capability of accumulating salt. In this paper, the effects of carbonization temperature and time on biochar yield and physicochemical properties of *Salicornia europaea* were analyzed. The results showed that the carbonization of *S. europaea* could effectively increase the values of pH, *EC* and ash content, in which the pH value could be reached to 10.37 and the ash content could be increased by 57.51% －110.98%. With the increase of carbonization temperature (300－600 ℃), the pH, *EC* and ash content of biochar were increased significantly, but the biochar yield was decreased. The contents of water-soluble Ca^{2+}, Mg^{2+}, total C and total N were decreased with the increase of temperature (≥400 ℃), but the contents of water-soluble Na^{+}, K^{+}, total P and total K were increased. In addition, with the increase of carbonization time, the pH, *EC* and contents of ash and water-soluble ions were increased gradually, but the content of total C was decreased. According to the physicochemical properties and preparation cost of biochar, it was considered that the best carbonization time was for 2 hours. This study could provide a reference for selecting the raw materials for improving acidic soil under biochar and the optimization of plant biochar preparation process.

Key words: *Salicornia europaea*; biochar; carbonization temperature; carbonization time; physicochemical property